1000-0569/2004/020(06)-1363-74 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

广东龙窝花岗闪长质岩体的年代学、地球化学及岩石成因*

邱检生[1,2] 胡建[2] McInnes B I A[3] 蒋少涌[1,2] 徐夕生[1,2] Allen C M[4]

QIU JianSheng[1,2], HU Jian[2], McInnes B I A[3], JIANG ShaoYong[1,2], XU XiSheng[1,2] and Allen C M[4]

1. 南京大学成矿作用国家重点实验室，南京 210093
2. 南京大学地球科学系，南京 210093
1. *State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*
2. *Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*
3. *CSIRO Exploration & Mining, Australian Resources Research Centre, Kensington, WA* 6151
4. *Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra, ACT* 0200

2004-02-06 收稿，2004-10-21 改回.

Qiu JS, Hu J, McInnes BIA, Jiang SY, Xu XS and Allen CM. 2004. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Longwo granodioritic pluton in Guangdong province. ***Acta Petrologica Sinica*****, 20(6):1363 – 1374**

Abstract The Longwo pluton is a typical example of the Early Yanshanian granites with mantle components in Nanling region. Lithologically, this pluton consists mainly of granodiorite, and contains melanocratic dioritic enclaves. Zircon ELA-ICP-MS dating for the granodiorites yields an age of 169.1 ± 2.5 Ma, indicating that they were formed in Middle Jurassic. Geochemically, the granodiorites are weakly peraluminous (A/NKC = 1.0 ~ 1.1), and are relatively poor in alkalis and rich in potassium (K_2O/Na_2O = 1.15 ~ 1.45). The rocks also have enriched LREE and LILE (e.g., Rb, Cs, Th, U) concentrations, and low HFSE (e.g., Nb, Ti) abundances. Dioritic enclaves have similar mineral assemblages to those of the host rocks, but contain more mafic minerals and higher contents of siderophile elements (e.g., V, Cr, Co, Ni). The variation trends of major and trace element abundances between the enclaves and the host rocks suggest a mixing process in their petrogenesis. They also display close Sr, Nd isotopic compositions, with I_{Sr} and $\varepsilon_{Nd}(t)$ values of 0.70843 ~ 0.70995, −6.53 ~ −8.89 for the host granodiorites, and of 0.70797 ~ 0.70882, −4.71 ~ −9.24 for the dioritic enclaves, which are all indicative of mixing of crustal materials with mantle components. A simple binary mixing calculation shows that the ratios of mantle components involved in the genesis ranged from 32.9% to 40.4% in the host granodiorites, and from 31.8% to 46.4% in the dioritic enclaves. Integrated geological and geochemical data suggested that the Longwo granodiorites and their dioritic enclaves were generated by mixing of mantle-derived basic magma and its induced crustal felsic magma under a tensile environment.

Key words Granodiorite; Dioritic enclaves; Zircon ELA-ICP-MS dating; Geochemistry; Petrogenesis; Longwo pluton, Guangdong province

摘 要 龙窝岩体是南岭地区燕山早期具幔源组分贡献的花岗岩的典型代表，其主体岩性为花岗闪长岩，岩体中含有深色闪长质包体。锆石 ELA-ICP-MS 定年结果表明花岗闪长岩的形成年龄为 169.1 ± 2.5 Ma，属中侏罗世岩浆活动的产物。地球化学特征上，该岩体铝弱过饱和(A/NKC = 1.0 ~ 1.1)，相对贫碱，富钾(K_2O/Na_2O = 1.15 ~ 1.45)，富轻稀土和大离子亲石元素(如 Rb、Cs、Th、U)，贫高场强元素(如 Nb、Ti)。闪长质包体具有与寄主岩相似的矿物组合，但铁镁矿物含量及过渡族元素(V、Cr、Co、Ni)丰度相对偏高，二者的主量和微量元素表现出混合成因的演化趋势。寄主岩与包体具有相近的 Sr、Nd 同位素组成，I_{Sr} 和 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 0.70843 ~ 0.70995、−6.53 ~ −8.89 和 0.70797 ~ 0.70882、−4.71 ~ −9.24，均表现出壳幔混源花岗岩类岩石的特点。二元混合模拟计算显示寄主岩与包体成岩过程中地幔物质的混入比例分别为 32.9% ~ 40.4% 和

* 本文为国家自然科学基金(编号:40132010)和国家创新研究群体科学基金(编号:40221301)联合资助成果.

第一作者简介：邱检生，男，1965 年 11 月生，博士，教授，岩石学专业，E-mail: jsqiuwyb@public1.ptt.js.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

31.8% ~ 46.4%。通过对岩石产出构造背景及地质地球化学特征的综合分析,表明龙窝花岗闪长岩及其中的闪长质包体是在伸展-引张环境下,由幔源基性岩浆及其诱发的壳源长英质岩浆混合作用的产物。

关键词 花岗闪长岩 闪长质包体 锆石 ELA-ICP-MS 定年 地球化学 岩石成因 广东龙窝岩体

中图法分类号 P588.121、P597.3

壳-幔相互作用在花岗岩成因过程中的重要性和普遍性已越来越多地得到证实。现代花岗岩成因理论认为,大多数花岗岩均是壳-幔相互作用的产物(Bergantz, 1989; Huppert & Sparks, 1998; 肖庆辉等,2003)。闪长质-花岗闪长质岩石作为岩浆源区深度为下地壳层次的典型岩石,记录了陆下岩石圈地幔与地壳相互作用的丰富信息,已成为探索花岗质岩石岩浆起源与深部作用过程的重要研究对象(Mass *et al.*, 1997; Shinjoe H., 1997; Waight *et al.*, 2001; 王岳军等, 2001; 毛建仁等,2002)。

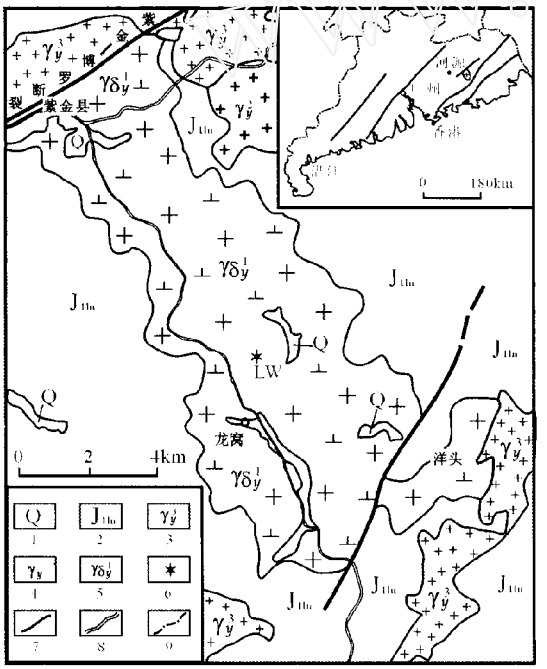

图1 龙窝花岗闪长质岩体地质略图

1-第四系;2-下侏罗统蓝塘群;3-燕山三期黑云母花岗岩;4-燕山二期黑云母花岗岩;5-燕山一期花岗闪长岩;6-锆石U-Pb定年采样点;7-断裂;8-公路;9-省界

Fig. 1 Sketch geological map of the Longwo granodioritic pluton

龙窝花岗闪长质岩体位于粤东紫金-博罗深断裂的南东侧,是广义的规模巨大的佛冈花岗岩带的组成部分。岩体出露面积约316 km^2,长轴呈北西向展布(图1),主体岩性为花岗闪长岩,其中可见深色闪长质包体。该岩体是南岭地区燕山早期具幔源组分贡献的花岗岩的典型代表,前人对其进行过一定程度的研究(赵子杰等,1987),但对岩浆源区性质及深部作用过程缺乏有效的地球化学制约,对岩体中深色闪长质包体的类型归属及其与寄主岩的成因联系缺乏深入探讨,为此,本文首先运用ELA-ICP-MS定年技术,对岩体的形成年龄进行了精确测定,然后在综合包体与寄主岩岩石学和地球化学特征的基础上,讨论了二者的成因联系,并据此探讨了岩石的成因。

1 岩体地质及岩石和矿物学特征

龙窝岩体侵入于下侏罗统蓝塘群砂页岩中,岩体与围岩接触面较陡,接触面倾向围岩。岩体岩性较均一,相带分异不明显,主要岩性为中粒或中细粒花岗闪长岩,仅在局部的边缘相带发育有少量的二长花岗岩。岩体中包体大小不一,形态各异,数量约占岩体总体积的1% ~2%,在岩体中呈随机分布,包体岩性主要为闪长岩或石英闪长岩。

花岗闪长岩的组成矿物主要为石英(25% ~30%)、斜长石(40% ~50%)、碱性长石(15% ~ 20%)、黑云母(5% ~10%)和少量角闪石(<3%),副矿物有锆石、磷灰石、钛铁氧化物和褐帘石等。斜长石An值多变化于25 ~45之间,环带构造发育,斜长石牌号及含量有自岩体内部至边缘略降低和减少的趋势。闪长质-石英闪长质包体的粒度较之花岗闪长岩明显偏细,组成矿物主要为斜长石(50% ~55%, An = 35 ~50)、黑云母(20% ~25%)、碱性长石(5% ~ 10%)、石英(5% ~15%)和角闪石(3% ~5%)等。

包体和寄主岩中的黑云母均具有富铁贫镁特征,$Mg^{\#}$值变化于0.34 ~0.45(表1),但包体中黑云母的$Mg^{\#}$值略高,变化范围略大,且自核心至边缘,其$Mg^{\#}$值有略降低的趋势。在周作侠(1988)提出的镁铁云母类矿物$\Sigma FeO/(\Sigma FeO + MgO) - MgO$图解上,样品点均落在高铁黑云母区(图2),种属均为铁黑云母。角闪石富镁、贫铝(MgO = 10.84% ~ 11.95%, Al_2O_3 = 2.50% ~ 6.34%, 表2),闪长质包体中角闪石的TiO_2、Al_2O_3含量较之花岗闪长岩中的角闪石相对偏高。按Leake *et al.* (1997)提出的闪石分类方案,闪长质包体中的角闪石主要为镁质角闪石,而花岗闪长岩中的角闪石主要为阳起石质角闪石(表2)。

2 年代学

对龙窝岩体的形成时代,前人已进行过K-Ar和Rb-Sr同位素年龄测定,所报道的黑云母单矿物K-Ar年龄为153 Ma、Rb-Sr全岩等时年龄为165.3 ±22 Ma(赵子杰等,1987)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 龙窝花岗闪长岩及闪长质包体中黑云母探针成份(%)

Table 1 Microprobe compositions of biotites from the Longwo granodiorites and dioritic enclaves(%)

序号	样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	F	Cl	总量	$Mg^{\#}$
1	Lw9-2-1	36.87	2.58	16.16	22.79	9.78		0.08	8.94	0.004	0.082	0.059	97.34	0.43
2	Lw9-2-2	36.09	3.17	16.19	21.83	9.21	0.002	0.10	9.19	0.031	0.088	0.076	95.97	0.43
3	Lw9-2-3	35.20	3.77	16.54	22.41	8.74		0.03	9.32	0.046	0.072	0.069	96.20	0.41
4	Lw9-2-4	36.71	3.42	15.81	21.41	9.69	0.013		8.77		0.061	0.061	95.95	0.45
5	Lw9-2-5	35.81	3.18	15.85	21.81	9.90		0.08	9.34	0.015	0.091	0.082	96.15	0.45
6	Lw9-18-1	35.31	4.08	15.00	22.30	8.17	0.021	0.08	9.17		0.063	0.079	94.27	0.40
7	Lw9-18-2	35.65	3.66	13.96	23.67	7.98		0.04	9.48		0.063	0.086	94.58	0.38
8	Lw9-18-3	35.33	2.73	15.92	24.43	8.52	0.026	0.05	9.30		0.054	0.096	96.45	0.38
9	Lw9-18-4	35.14	3.66	15.24	24.69	8.43	0.010	0.10	9.38	0.008	0.027	0.070	96.75	0.38
10	Lw9-18-5	34.82	3.82	15.33	25.18	7.43		0.04	9.20		0.071	0.092	95.98	0.34
11	Lw9-3-1	35.72	3.10	16.04	22.95	7.40	0.030	0.09	9.00		0.093	0.078	94.50	0.36
12	Lw9-3-2	35.18	3.58	16.32	22.44	7.83		0.10	9.04		0.066	0.055	94.61	0.38
13	Lw9-3-3	35.74	3.46	15.85	22.65	7.03	0.010		9.29	0.021	0.081	0.058	94.20	0.36
14	Lw9-3-4	35.66	3.74	15.70	22.06	8.03	0.013	0.03	9.26		0.074	0.063	94.63	0.39
15	Lw9-3-5	36.29	3.25	15.84	22.51	7.92	0.018	0.01	8.28		0.082	0.039	94.25	0.39
16	Lw9-19-1	35.48	3.84	14.91	24.62	7.91		0.04	9.00	0.008	0.077	0.061	95.95	0.36
17	Lw9-19-2	35.76	3.70	15.52	24.03	8.39		0.09	8.55		0.051	0.062	96.15	0.38
18	Lw9-19-3	34.66	3.23	15.38	24.16	8.39		0.06	9.17		0.090	0.081	95.20	0.38
19	Lw9-19-4	36.06	3.57	15.09	23.02	7.56	0.015	0.04	9.16		0.096	0.067	94.68	0.37
20	Lw9-19-5	35.74	3.66	15.47	24.42	8.05	0.003	0.06	9.04	0.027	0.063	0.046	96.58	0.37

1－10为闪长质包体中的黑云母，11－20为寄主岩(花岗闪长岩)中的黑云母。$Mg^{\#} = Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+})$，数据由南京大学成矿作用国家重点实验室测定。

表 2 龙窝花岗闪长岩及闪长质包体中角闪石的探针成份(%)

Table 2 Microprobe compositions of amphiboles from the Longwo granodiorites and dioritic enclaves(%)

序号	探针成分(wt%)									
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	总量
1	49.37	0.52	4.80	18.44		11.22	12.48	0.52	0.18	97.53
2	48.61	0.69	6.34	18.69		10.95	11.77	0.71	0.28	98.04
3	48.36	0.59	5.87	19.22		11.01	11.42	0.74	0.25	97.46
4	49.53	0.69	5.88	17.53	0.91	11.21	11.78	0.74	0.35	98.62
5	47.56	0.91	6.11	17.33	0.91	10.84	12.38	0.71	0.46	97.21
6	49.73	0.35	3.62	18.22	1.04	10.99	12.32	0.53	0.15	96.95
7	51.52	0.23	2.67	19.42	1.11	11.78	11.34	0.36	0.15	98.58
8	50.26	0.43	4.50	19.38	1.12	11.16	10.97	0.47	0.19	98.48
9	52.46	0.06	2.50	17.82	0.84	11.95	11.42	0.19	0.09	97.33

序号	分子式中离子系数												种属
	T		C						B		A		
	Si^{4+}	Al^{iv}	Al^{vi}	Fe^{3+}	Ti^{4+}	Mg^{2+}	Fe^{2+}	Mn^{2+}	Ca^{2+}	Na^{+}	Na^{+}	K^{+}	
1	7.33	0.67	0.17	0.23	0.06	2.48	2.06		1.99	0.02	0.14	0.03	阳起石质角闪石
2	7.14	0.86	0.23	0.52	0.08	2.40	1.77		1.85	0.15	0.05	0.05	镁质角闪石
3	7.13	0.87	0.15	0.73	0.07	2.42	1.64		1.80	0.20	0.02	0.05	镁质角闪石
4	7.23	0.78	0.24	0.43	0.08	2.44	1.71	0.11	1.84	0.16	0.05	0.07	镁质角闪石
5	7.12	0.88	0.20	0.22	0.10	2.42	1.95	0.12	1.98	0.02	0.19	0.09	镁质角闪石
6	7.45	0.55	0.09	0.24	0.04	2.46	2.04	0.13	1.98	0.02	0.13	0.03	阳起石质角闪石
7	7.48	0.46		0.82	0.03	2.55	1.47	0.14	1.76	0.10		0.03	阳起石质角闪石
8	7.29	0.71	0.05	0.99	0.05	2.41	1.36	0.14	1.70	0.13		0.04	阳起石质角闪石
9	7.67	0.33	0.10	0.56	0.01	2.61	1.62	0.10	1.79	0.05		0.02	阳起石

1－5为闪长质包体中的角闪石，6－9为寄主岩(花岗闪长岩)中的角闪石。分子式中离子系数以23个氧原子计算，其中Fe^{3+}与Fe^{2+}按殷俊等(1994)方法，以13CNK为校正参数调整，7号样品分子式的离子系数中T位尚有0.06的Fe^{3+}。数据由南京大学成矿作用国家重点实验室测定。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

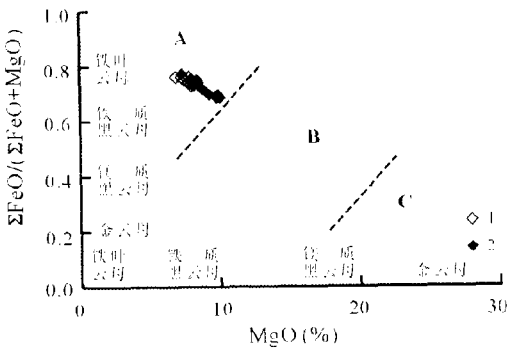

图2 龙窝花岗闪长岩及闪长质包体中黑云母的 MgO - ΣFeO/(ΣFeO + MgO)分类图(据周作侠,1988)

A-高铁黑云母区; B-高镁黑云母区; C-金云母区; 1-寄主岩花岗闪长岩中的黑云母; 2-闪长质包体中的黑云母。

Fig. 2 MgO versus ΣFeO/(ΣFeO + MgO) classification diagram for biotites from the Longwo granodiorites and dioritic enclaves (after Zhou Z X, 1988)

由于 K-Ar 体系的抗扰动性差,使得 K-Ar 年龄常偏离地质体的实际年龄,加之精度较低,往往导致定年结果存在某些不确定性,而该岩体报道的全岩 Rb-Sr 等时年龄又由于样品点在等时线图上相关程度较低($r = 0.96$),误差较大(± 22 Ma),结果同样不十分理想。为准确获得该岩体的成岩年龄,我们运用新近发展起来的高精度的 ELA-ICP-MS(Excimer Laser Ablation- Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)定年技术,对岩体的形成年龄进行了精确测定。该方法具有快速、经济及可对锆石不同区域同时测定等优点,其精确度与 SHRIMP 方法基本相同(Ballard *et al.*, 2001; Black *et al.*, 2003)。

本次实验在澳大利亚国立大学地球科学研究所 ICP-MS 实验室完成,详细的分析技术见 Ballard *et al.* (2001)。我们共测定了 36 个锆石点的年龄,其中 3 个锆石点(No. 9、28、31)由于太高的普通铅含量未能获得合理结果,剩余 33 个锆石点的定年结果列于表 3。由这些分析点所构成的不一致线上、下交点年龄分别为 1940 ± 28 Ma 和 171.3 ± 7.7 Ma (MSWD = 22,图 3),不一致线上交点年龄应为继承锆石年龄,指示成岩过程中有古老地壳物质的参与,而下交点年龄则应视为岩浆结晶年龄。在所获得结果的 33 个锆石点中,除 No. 11 号锆石点外,其余样品点均落在下交点附近(图 3-A)。由于半衰期差异,锆石中放射成因 ^{207}Pb 的丰度比放射成因 ^{206}Pb 的丰度约低一个数量级,因而对年轻锆石来说,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值精度较高(Compston *et al.*, 1992)。由下交点附近 32 个锆石点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄频数分布直方图可以看出,峰值变化于 160 ~ 180 Ma 之间(图 3-B),分布在这一年龄段的锆石点共 24 个,占获得合理结果锆石点总数的 73%,其中 12 个锆石点在 $^{207}Pb/^{235}U - ^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图中的谐和度大于 95%(图 3-C),由这 12 个锆石点数据计算的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄统计权重平均值为 169.1 ± 2.5 Ma,与下交点年龄十分接近,但这一结果的 MSWD 值较小(为 4.8),表明有更高的准确度,可以较精确地反映岩体的形成年龄,因此,龙窝岩体应为中侏罗世岩浆活动的产物。

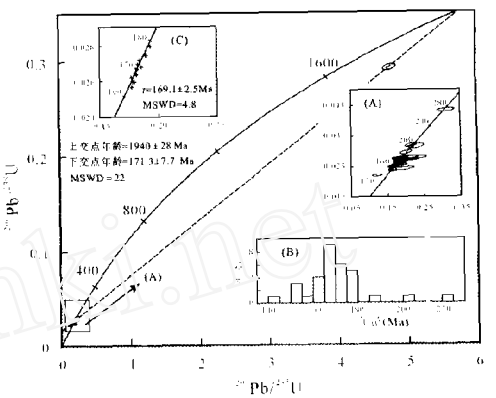

图3 龙窝岩体锆石 U-Pb 谐和图

(A)为下交点附近样品点年龄谐和图;(B)为下交点附近样品点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄频数分布直方图;(C)为 160 ~ 180Ma 峰值区间谐和度大于 95% 样品点年龄谐和图。

Fig. 3 U-Pb concordia diagram for zircons from the Longwo pluton

3 地球化学

表 4 列出了龙窝岩体及其中闪长质包体代表性岩石样品的主量、微量和稀土元素测定结果。

3.1 主量元素

根据本文测试数据,结合前人已有资料(赵子杰等,1987),龙窝花岗闪长岩在化学成份上具有以下特征:(1)铝弱过饱和,A/NKC 值主要变化于 1.0 ~ 1.1 之间,CIPW 标准矿物计算结果中均出现刚玉分子,但含量多在 1% 以下,与典型的强过铝 S 型花岗岩(A/NKC > 1.1、CIPW 标准矿物中刚玉分子含量 > 1%, Chappell & White, 2001)明显有别。(2)相对贫碱,$K_2O + Na_2O$ 介于 6.58% ~ 7.49%,碱铝指数(AKI 值)变化于 0.57 ~ 0.69;在 A/NKC - AKI 关系图上,绝大多数样品点均投影在亚碱过铝质区域(图 4);按洪大卫等(1987)提出的碱性、偏碱性和钙碱性花岗岩 AKI 值变化范围(≥1.0、0.9 ~ 1.0 和 < 0.9),同时考虑岩体中含有角闪石,表明岩体应属典型的钙碱性花岗岩。(3)富钾,$K_2O > Na_2O$,K_2O/Na_2O 比值变化于 1.15 ~ 1.45,其总体特征相似于 Barbarin (1999)划分的富钾钙碱性花岗岩类(KCG)。(4)闪长质包体较之寄主岩明显贫硅、碱,富铁、镁、钙、锰、钛,$Na_2O > K_2O$ (K_2O/Na_2O = 0.69 ~ 0.92,表 4),与寄主岩相

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对富钾的特征明显有别。在 Harker 图解上，闪长质包体和寄主岩的 SiO_2 与 TiO_2、Al_2O_3、TFeO、MgO 具显著的负消长线性演化关系（图 5a－d）；在同分母的氧化物比值相关图上（如 $Al_2O_3/CaO - Na_2O/CaO$、$SiO_2/CaO - Na_2O/CaO$、$Al_2O_3/MgO - SiO_2/MgO$ 和 $MgO/K_2O - CaO/K_2O$，图 5e－h）也构成良好的线性相关，说明包体与寄主岩可能为混合作用演化关系，因为在分离结晶作用过程中，由于受固溶体矿物晶出的影响，其演化线多为曲线，而不是直线（周珣若，1994）。

表 3 龙窝岩体锆石 ELA-ICP-MS 定年结果

Table 3 ELA-ICP-MS dating results for zircons from the Longwo pluton

测定	同位素原子比率						表面年龄（Ma）					
点号	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
1	0.04339	0.00023	0.3073	0.0066	0.0514	0.0011	273.9	1.5	275.4	7.8	286.8	8.0
2	0.02669	0.00015	0.1903	0.0040	0.0517	0.0011	169.3	1.0	175.9	3.8	259.7	5.2
3	0.02722	0.00014	0.1857	0.0026	0.0495	0.0006	173.1	0.9	171.4	2.4	149.0	1.9
4	0.02670	0.00014	0.1880	0.0028	0.0511	0.0007	169.5	0.9	169.9	2.8	174.8	2.7
5	0.02603	0.00014	0.1831	0.0022	0.0510	0.0006	165.3	0.9	166.3	2.2	179.0	2.2
6	0.02652	0.00019	0.1969	0.0050	0.0538	0.0013	167.9	1.2	175.6	5.5	274.0	8.0
7	0.02419	0.00015	0.1630	0.0028	0.0489	0.0008	154.1	1.0	151.3	2.6	108.8	1.8
8	0.02683	0.00009	0.1907	0.0019	0.0516	0.0005	170.2	0.6	172.9	1.9	206.7	2.1
10	0.02797	0.00023	0.1914	0.0028	0.0496	0.0006	177.9	1.4	179.7	2.6	201.7	2.4
11	0.29204	0.00143	4.7533	0.0367	0.1180	0.0007	1622.8	7.1	1776.1	6.7	1925.8	5.5
12	0.02390	0.00022	0.1651	0.0036	0.0501	0.0010	152.1	1.4	153.8	3.9	178.2	4.2
13	0.02551	0.00012	0.1716	0.0029	0.0488	0.0008	162.5	0.8	160.1	3.8	128.8	3.0
14	0.02419	0.00023	0.1744	0.0053	0.0523	0.0015	153.5	1.5	176.1	11.7	472.1	27.1
15	0.03194	0.00020	0.2158	0.0055	0.0490	0.0012	203.0	1.3	197.0	5.5	130.9	3.7
16	0.02638	0.00009	0.1840	0.0019	0.0506	0.0005	167.6	0.6	169.4	1.7	192.0	1.9
17	0.02717	0.00019	0.1917	0.0021	0.0512	0.0004	172.5	1.2	171.3	2.6	157.5	2.1
18	0.02647	0.00025	0.1774	0.0042	0.0486	0.0010	168.6	1.6	165.0	3.8	117.9	2.5
19	0.02586	0.00012	0.2591	0.0037	0.0727	0.0010	159.9	0.7	153.9	4.5	69.7	2.1
20	0.02576	0.00023	0.1943	0.0053	0.0547	0.0014	162.9	1.5	165.9	5.6	205.1	6.6
21	0.02558	0.00013	0.1859	0.0032	0.0527	0.0009	162.1	0.8	178.3	4.1	384.5	7.9
22	0.02597	0.00011	0.1809	0.0021	0.0505	0.0006	165.0	0.7	167.6	2.6	201.3	2.9
23	0.02652	0.00011	0.1743	0.0021	0.0477	0.0006	169.1	0.7	163.3	2.6	87.0	1.4
24	0.02698	0.00018	0.1849	0.0029	0.0497	0.0007	171.6	1.2	170.4	2.7	155.1	2.2
25	0.02747	0.00029	0.1897	0.0053	0.0501	0.0013	174.6	1.8	176.1	5.5	194.9	5.7
26	0.02976	0.00022	0.4319	0.0126	0.1053	0.0030	176.5	1.5	183.6	12.7	271.5	18.0
27	0.02768	0.00019	0.1901	0.0046	0.0498	0.0012	176.0	1.2	185.7	11.0	303.1	16.9
29	0.02625	0.00009	0.1786	0.0019	0.0493	0.0005	167.0	0.6	165.6	2.0	147.7	1.7
30	0.02705	0.00015	0.1937	0.0041	0.0519	0.0011	171.6	0.9	185.6	11.9	357.0	21.1
32	0.02796	0.00012	0.1932	0.0021	0.0501	0.0005	177.7	0.8	179.6	1.9	202.8	2.0
33	0.02638	0.00010	0.1805	0.0024	0.0496	0.0006	167.8	0.6	169.6	2.4	193.1	2.6
34	0.02757	0.00020	0.1905	0.0047	0.0501	0.0012	175.2	1.3	192.8	16.3	400.4	30.5
35	0.02986	0.00027	0.2304	0.0058	0.0560	0.0013	188.3	1.7	185.0	5.5	146.2	4.2
36	0.02281	0.00016	0.2079	0.0043	0.0661	0.0013	142.3	1.0	116.7	5.0	0.3	0.0

数据由澳大利亚国立大学地球科学研究所 ICP-MS 实验室测定

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表4 龙窝花岗闪长岩及闪长质包体主量、微量及稀土元素含量

Table 4 Major, trace and rare earth element contents of the Longwo granodiorites and dioritic enclaves

岩性	花岗闪长岩									闪长质包体	
样号	LW9-3	LW9-5	LW9-8	LW9-9	LW9-12	LW9-14	LW9-16	LW9-17	LW9-19	LW9-2	LW9-18
主量元素(wt%)											
SiO_2	68.93	69.51	68.30	68.96	71.26	67.31	68.73	67.39	68.27	60.68	59.97
TiO_2	0.37	0.47	0.43	0.46	0.26	0.50	0.40	0.48	0.44	0.92	0.97
Al_2O_3	14.41	14.88	14.99	15.26	14.45	15.52	15.14	15.50	15.35	16.27	16.30
$Fe_2O_3^T$	2.84	2.80	3.25	3.00	2.11	3.81	3.14	3.53	3.30	6.78	6.92
MnO	0.07	0.05	0.06	0.05	0.04	0.08	0.08	0.07	0.07	0.13	0.14
MgO	0.90	0.82	1.22	1.02	0.72	1.55	1.21	1.37	1.15	3.02	2.65
CaO	2.75	2.55	3.09	1.83	2.02	3.54	2.99	3.31	3.06	4.70	5.51
Na_2O	2.99	2.89	3.00	3.32	3.22	3.00	3.05	3.10	3.08	2.78	3.50
K_2O	3.72	4.19	3.95	4.08	4.27	3.58	3.80	3.55	3.90	2.56	2.41
P_2O_5	0.10	0.14	0.13	0.15	0.10	0.13	0.11	0.14	0.12	0.18	0.20
烧失	0.50	0.95	0.56	1.32	0.57	0.65	0.50	0.86	0.44	0.93	0.76
总量	97.58	99.25	98.98	99.44	99.03	99.68	99.14	99.30	99.18	98.95	99.33
ALK	6.71	7.08	6.95	7.40	7.49	6.58	6.85	6.65	6.98	5.34	5.91
K/Na	1.25	1.45	1.32	1.23	1.33	1.19	1.25	1.15	1.27	0.92	0.69
AKI	0.62	0.62	0.61	0.65	0.69	0.57	0.60	0.58	0.61	0.45	0.51
A/NKC	1.03	1.07	1.01	1.16	1.06	1.02	1.04	1.04	1.03	1.02	0.89
微量元素(ppm)											
Rb	213	213	171	132	246	177	194	169	205	254	205
Sr	215	241	304	402	172	279	233	250	237	246	220
Ba	367	549	401	676	287	440	362	424	391	286	409
U	10.62	9.27	8.31	6.12	12.53	6.07	12.07	10.13	9.40	9.71	4.17
Th	17.31	19.72	24.91	16.77	18.79	16.55	12.96	19.04	22.18	11.39	10.44
Ga	20.72	20.02	19.73	20.07	19.72	19.44	18.37	18.75	19.55	21.25	19.84
Y	21.12	11.22	22.59	14.05	15.08	20.28	25.56	18.83	23.82	19.96	22.58
Sc	6.06	3.77	8.04	5.06	4.92	8.63	7.66	6.76	6.74	12.76	12.70
Nb	10	6	10	7	11	8	11	8	10	7	14
Zr	114	145	127	137	99	140	123	143	125	142	152
V	43.18	25.71	48.43	36.82	29.04	60.52	48.17	56.12	48.28	131.82	138.50
Cr	11.15	6.80	19.39	11.67	9.55	23.09	19.50	18.72	15.15	31.33	13.70
Co	4.99	4.21	7.04	5.26	3.68	8.17	6.04	7.06	6.07	15.13	15.32
Ni	3.19	2.92	4.64	4.06	2.67	5.71	4.52	4.51	4.01	6.00	6.67
Rb/Sr	0.99	0.88	0.56	0.33	1.43	0.63	0.83	0.68	0.86	1.03	0.93
Rb/Ba	0.58	0.39	0.43	0.20	0.86	0.40	0.54	0.40	0.52	0.89	0.50
Th/U	1.63	2.13	3.00	2.74	1.50	2.73	1.07	1.88	2.36	1.17	2.50
稀土元素(ppm)											
La	29.11	39.66	43.49	33.09	26.09	29.19	19.40	31.63	34.33	28.25	29.37
Ce	59.05	77.99	86.52	65.46	53.28	59.61	39.90	63.36	69.97	57.62	59.25
Pr	6.53	8.57	9.50	7.15	6.07	6.82	4.56	6.92	7.92	6.72	6.97
Nd	25.29	30.10	33.77	26.61	22.44	25.35	18.05	25.50	29.06	25.81	26.91
Sm	5.45	5.51	5.95	4.93	4.94	5.08	4.21	4.82	5.89	5.26	5.64
Eu	0.83	0.98	1.00	0.99	0.63	0.93	0.77	0.82	0.86	0.81	0.86
Gd	5.14	4.91	5.55	4.69	4.47	5.07	4.32	4.81	5.64	5.26	5.90
Tb	0.74	0.58	0.78	0.58	0.61	0.70	0.71	0.65	0.81	0.75	0.85
Dy	3.80	2.42	3.92	2.69	2.95	3.67	4.24	3.32	4.22	3.86	4.51
Ho	0.70	0.38	0.77	0.47	0.50	0.68	0.85	0.64	0.78	0.69	0.81
Er	1.90	0.93	2.14	1.24	1.40	1.94	2.57	1.84	2.24	1.79	2.15
Tm	0.27	0.12	0.29	0.17	0.21	0.27	0.40	0.26	0.32	0.25	0.27
Yb	1.81	0.75	2.01	1.09	1.45	1.77	2.92	1.77	2.21	1.53	1.73
Lu	0.27	0.11	0.28	0.17	0.22	0.27	0.45	0.27	0.33	0.23	0.25
ΣREE	140.90	173.00	195.98	149.32	125.26	141.33	103.34	146.58	164.58	138.81	145.44
LR/HR	8.63	15.98	11.45	12.47	9.61	8.85	5.28	9.82	8.94	8.67	7.84
$(La/Yb)_N$	10.85	35.70	14.57	20.54	12.15	11.11	4.48	12.08	10.46	12.45	11.47
δEu	0.47	0.57	0.52	0.62	0.41	0.55	0.54	0.51	0.45	0.46	0.45
t(℃)	754.0	777.1	758.1	779.0	746.7	764.7	758.7	769.1	758.7	756.8	741.8

ALK = $K_2O + Na_2O$; K/Na = K_2O/Na_2O; AKI = $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$,(分子比); A/NKC = $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO)$,(分子比); t为据 Watson & Harrison (1983)方法计算的锆石饱和温度。主量元素和Sr,Ba,Nb,Zr在澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)矿业与勘探研究所(Division of Exploration & Mining)用XRF方法测定,精度优于5%;其它微量元素(包括稀土元素)在澳大利亚悉尼科技大学(University of Technology, Sydney)用ICP-MS方法分析,精度优于5%~10%。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

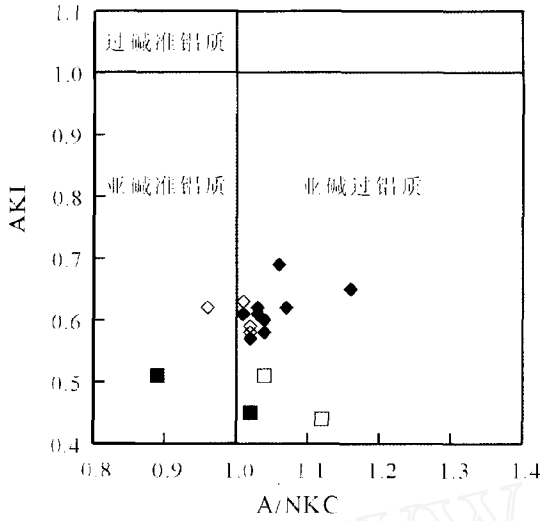

图4　龙窝岩体 A/NKC－AKI 关系图

方块为闪长质包体，菱形为花岗闪长质寄主岩，其中实心符号为本文资料，空心符号据赵子杰等(1987)

Fig. 4　A/NKC versus AKI diagram of the Longwo pluton

3.2　微量元素及稀土元素

龙窝花岗闪长岩与闪长质包体具有相似的微量元素分布模式，在相对于原始地幔标准化蛛网图上，均表现出显著的 Cs、U、K 正异常和 Ba、Nb、P、Ti 负异常(图 6－a，b)。尽管闪长质包体较之花岗闪长岩具偏高的 V、Cr、Co、Ni 等过渡族元素含量(表 4)，但在反映岩石分异演化程度的元素比值(如 Rb/Sr、Th/U 等)上，并不显示自闪长质包体至花岗闪长岩，上述元素比值依次升高的变异趋势，说明二者并非是分异演化关系。闪长质包体与花岗闪长岩的同分母微量元素比值(如 Co/Nb－V/Nb、V/Ga－Co/Ga)显示良好的线性相关，在部分元素比值-比值关系图(如 Co/Th－Nb/Ni)上，二者的成分点呈双曲线分布。这些特征符合 Langmuri *et al.* (1978)总结的二端元混合体系中微量元素的变异趋势，同样说明二者最可能为混合作用的演化关系。

稀土元素组成上，龙窝岩体稀土总量相对偏低，ΣREE = 103.34 ~ 195.98 ppm；富轻稀土，LREE/HREE = 5.28 ~ 15.98，$(La/Yb)_N$ = 4.48 ~ 35.76；具中等程度的铕负异常，δEu = 0.41 ~ 0.62(表 4)。稀土配分型式呈明显的右倾斜形(图 7-a)，与南岭地区典型陆壳改造型花岗岩所表现出的"海鸥型"稀土配分型式(徐克勤等，1989)有较显著差异，而相似于日本西南部弧前(forearc)地区(Shinjoe，1997)，以及我国湘东南(王岳军等，2001)和闽西南(毛建仁等，2002)等地的壳幔混合成因花岗闪长质岩石。闪长质包体的稀土元素配分型式(图 7-b)同样与寄主岩——花岗闪长岩十分相似。自闪长质包体至花岗闪长岩，岩石的铕负异常并没有增强趋势，同样说明二者并非是同源岩浆分异结晶的产物，因为同源岩浆在分异演化过程中，随着斜长石和钾长石等矿物的分离结晶，残余岩浆的铕负异常将愈趋显著。闪长质包体和花岗闪长岩稀土元素之间(如 Ce-La、Sm-Nd)显示正消长线性演化关系，符合二端员岩浆混合的稀土元素演化趋势(周珣若，1994)。

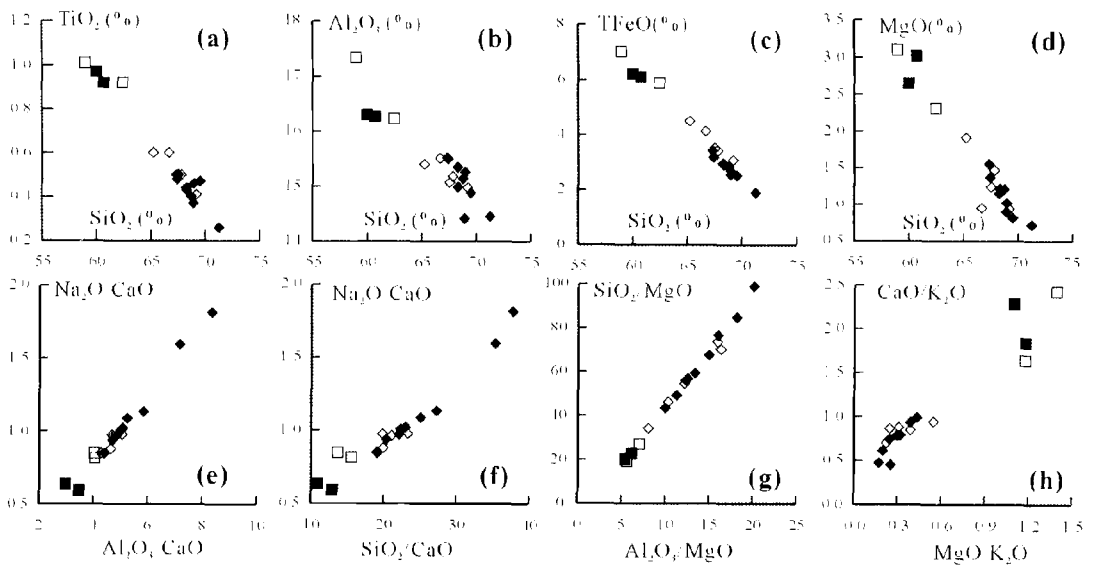

图5　龙窝岩体 Harker 图解(图例及资料来源同图 4)

Fig. 5　Harker diagram of the Longwo pluton

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

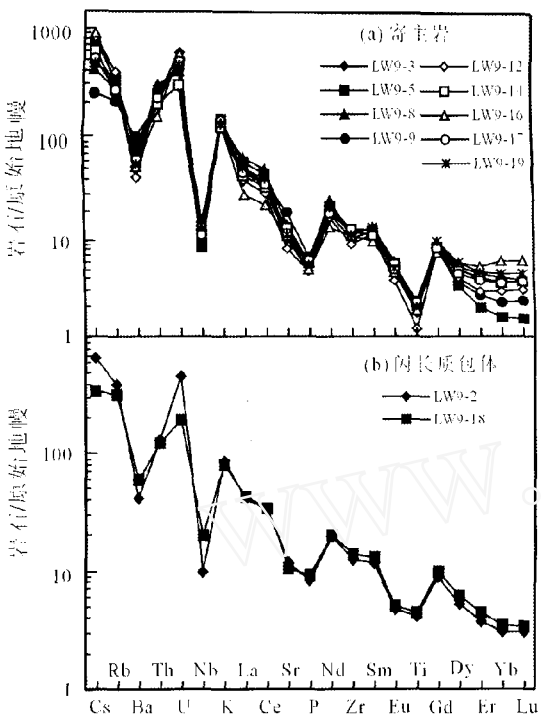

图6 龙窝花岗闪长岩及闪长质包体微量元素相对于原始地幔标准化蛛网图

原始地幔标准化值据 Sun & McDonough(1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spidergrams for trace elements of the Longwo granodiorites and dioritic enclaves

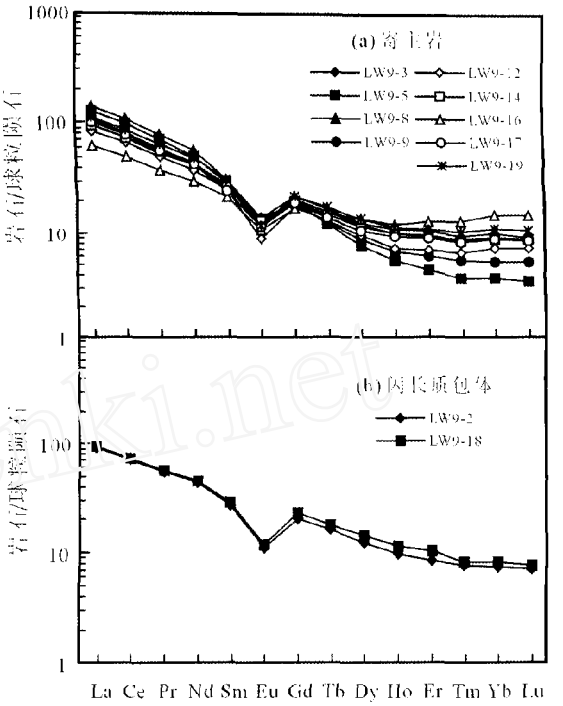

图7 龙窝花岗闪长岩及闪长质包体稀土元素球粒陨石标准化配分型式

球粒陨石标准化值据 Boynton(1984)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Longwo granodiorites and dioritic enclaves

3.3 Sr-Nd 同位素

龙窝花岗闪长岩和闪长质包体具有相似的 Sr、Nd 同位素组成,二者的 I_{Sr} 和 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 0.70843 ~ 0.70995、-6.53 ~ -8.89 和 0.70797 ~ 0.70882、-4.71 ~ -9.24(表5),Sr、Nd 同位素组成与澳大利亚 Lachlan 褶皱带 I 型花岗岩的变化范围相近,而明显偏离区内基底变质岩——云开群的变化范围(图8),说明它们并非单纯起源于基底变质岩的部分熔融。在 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - t 图解中,二者的投影点或位于华南元古代地壳演化域上方,或落在演化域内但靠近成熟度低的演化线 A 分布(图9),也指示成岩过程中有幔源组分的参与。为减少地壳阶段 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值变化对模式年龄计算的影响,我们采用二阶段模式计算了花岗闪长岩及其中闪长质包体的 Nd 模式年龄。由表5可看出,二者的 T_{DM} 值分别为 1.49 ~ 1.68Ga 和 1.34 ~ 1.71Ga,较之华夏地块基底变质岩的 Nd 模式年龄(主要为早元古代,沈渭洲等,1993)均偏低。近年来,在华南相继识别出多条具低 T_{DM} 值的花岗岩带,这些具低 T_{DM} 值的花岗岩理论上可通过二种方式形成,其一为起源于年轻地壳物质的部分熔融,其二是成岩过程中有不同比例地幔物质的加入。由于本区基底岩石的 T_{DM} 值主要为早元古代(沈渭洲等,1993),不支持年轻地壳的存在,因此,目前普遍认为这些具低 T_{DM} 值的花岗岩是地幔物质参与成岩过程的重要表现(Gilder *et al.*, 1996; Chen & Jahn, 1998; Hong *et al.*, 1998; Shen *et al.*, 2000)。选择于津生等(1991)报道的区内云开群中具最低 ε_{Nd} 值的变质岩作为地壳端元[Nd = 11.18 ppm, $\varepsilon_{Nd}(t = 169.1\ Ma) = -20.24$],与亏损地幔[Nd = 14 ppm, $\varepsilon_{Nd}(t = 169.1\ Ma) = 9.60$, Faure, 1986]进行二元混合模拟计算,可以得出龙窝花岗闪长岩和闪长质包体成岩过程中地幔物质的卷入比例分别为 32.9% ~ 40.4% 和 31.8% ~ 46.4%(表5)。龙窝花岗闪长岩的全岩 $\delta^{18}O$ 值变化于 8.9‰ ~ 10.2‰、平均为 9.6‰(赵子杰等,1987),与区内同熔型花岗岩的全岩氧同位素组成相似(徐克勤等,1989),这一特征同样支持成岩过程中有幔源组分的混入。因此,龙窝花岗闪长岩和其中的闪长质包体是壳幔岩浆混合作用的产物。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表5　龙窝花岗闪长岩及闪长质包体 Sr-Nd 同位素组成

Table 5　Sr-Nd isotopic compositions of the Longwo granodiorites and dioritic enclaves

样号	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	I_{Sr}	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	T_{DM} (Ga)	f (%)
闪长质包体												
LW9-2	256.9	239.7	3.251	0.716278 ±14	0.70846	5.880	28.81	0.1234	0.512228 ±9	−6.42	1.48	40.8
LW9-10	280.2	188.7	4.506	0.718801 ±14	0.70797	6.762	35.88	0.114	0.512305 ±8	−4.71	1.34	46.4
LW9-18	207.5	214.7	2.931	0.715863 ±9	0.70882	5.966	28.09	0.1284	0.512089 ±22	−9.24	1.71	31.8
花岗闪长岩												
LW9-3	202.6	218.6	2.812	0.716711 ±6	0.70995	5.919	27.31	0.1311	0.512110 ±19	−8.89	1.68	32.9
LW9-9	132.9	398.6	1.011	0.711774 ±7	0.70934	5.398	28.82	0.1133	0.512211 ±13	−6.53	1.49	40.4
LW9-19	203.5	240.4	2.538	0.714502 ±7	0.70843	6.289	30.76	0.1237	0.512158 ±9	−7.79	1.59	36.4

$^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 所示的 2σ 误差为小数点后的最后位数，为减少 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 变化对 Nd 模式年龄计算产生的影响，表中所列 T_{DM} 年龄统一采用二阶段模式计算，计算公式如下：

$T_{2DM}=(1/\lambda)\ln(1+A)$，$A=\{(^{143}Nd/^{144}Nd)_m-(^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM}-[(^{147}Sm/^{144}Nd)_m-(^{147}Sm/^{144}Nd)_c](e^{\lambda t}-1)\}/[(^{147}Sm/^{144}Nd)_c-(^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM}]$。式中：下角标 m 代表样品现今测定值；下角标 DM 代表亏损地幔值，$(^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM}=0.2136$，$(^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM}=0.513151$（Miller & O'Nions, 1985）；下角标 c 代表大陆壳平均值，$(^{147}Sm/^{144}Nd)_c=0.118$（Jahn & Condie, 1995），$t$ 为样品结晶年龄（=169.1Ma），$\lambda=6.54\times10^{-12}$。$f$ 为按二元混合模拟计算的成岩过程中地幔物质的卷入比例，混合端元及参数的选择详见正文。Sr, Nd 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所用 VG354 质谱测定，在本文样品分析过程中，该仪器测定的 NBS 987 标样的 $^{87}Sr/^{86}Sr=0.710214\pm11(2\sigma)$，BCR-1 标样的 $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512602\pm10(2\sigma)$，Sr 和 Nd 同位素比值分别采用 $^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$ 进行质量分馏校正。

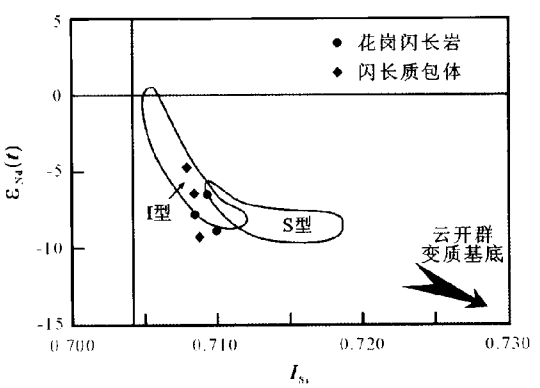

图8　龙窝花岗闪长岩及闪长质包体 $I_{Sr}-\varepsilon_{Nd}(t)$ 关系图

云开群变质岩的 Sr、Nd 同位素组成据于津生等（1991），I 型和 S 型花岗岩的 Sr、Nd 同位素组成变化范围据 McCulloch & Chappell (1982)。

Fig. 8　I_{Sr} versus $\varepsilon_{Nd}(t)$ diagram of the Longwo granodiorites and dioritic enclaves

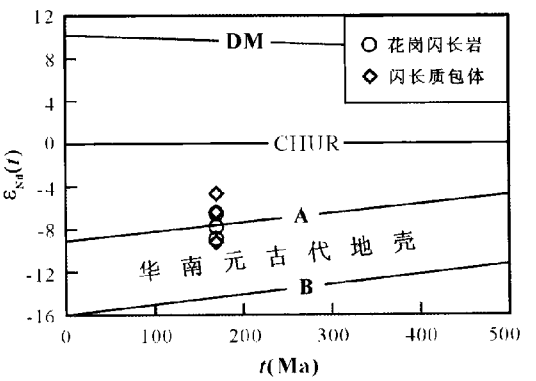

图9　龙窝花岗闪长岩及闪长质包体 $\varepsilon_{Nd}(t)-t$ 关系图

A-成熟度较低的元古代地壳；B-成熟度较高的元古代地壳；DM-亏损地幔；CHUR-球粒陨石均一储库。底图据沈渭洲等（1993）。

Fig. 9　$\varepsilon_{Nd}(t)-t$ diagram of the Longwo granodiorites and dioritic enclaves

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 讨论

4.1 深色闪长质包体的类型归属

花岗质岩石中暗色包体的研究对于揭示岩浆的起源、演化及其动力学过程具有重要的意义。前人对花岗质岩石中暗色包体的成因已进行过广泛探索,概括起来主要有以下几种观点:(1)暗色包体是岩浆源区的难熔残留物;(2)暗色包体是岩浆中早期晶出矿物的堆积体;(3)暗色包体是岩浆液态不混溶作用(熔离作用)的产物;(4)暗色包体是由岩浆混合作用所形成。

龙窝花岗闪长岩中的深色闪长质包体具典型的火成结构(主要为细粒半自形粒状结构),其组成矿物种类与寄主岩相似,但铁镁矿物(黑云母、角闪石)的含量更高。包体中缺乏典型的富铝矿物(如红柱石、堇青石、石榴子石等)及云母类矿物脱水形成的残留矿物。其 Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素含量及 Rb/Sr、Rb/Ba 和 Th/U 比值等均较高,表明它们并非是岩浆源区的难熔残留物,前述包体与寄主岩地球化学特征的演变趋势也不支持包体为岩浆中早期晶出矿物的堆积体。因此,闪长质包体或为同源岩浆不混熔作用(熔离作用)的产物,或为不同源岩浆经混合作用形成。

考虑到包体与寄主岩之间同种矿物(如黑云母、角闪石)的成分略有区别,以及二者主量和微量元素之间的变异趋势表现为混合作用演化关系,我们认为龙窝花岗闪长岩中的深色闪长质包体应为岩浆混合作用的产物。这一认识也得到其它一些证据的支持,如闪长质包体呈椭圆形、透镜状或扁豆状的塑性形态,可见花岗闪长岩呈柔褶状侵入闪长质包体中,以及包体中含有与寄主岩中成份及粒径相似的斜长石捕虏晶等。包体富含黑云母,说明混合端员中的镁铁质岩浆具较高的水含量,这有利于其呈液态存在于花岗质岩浆中并与之发生化学混合(Grasset & Albarede, 1994)。包体中冷凝边及针状磷灰石相对不发育,以及缺乏反向脉等特征指示岩浆混合作用发生在较深部位,发生混合的两种岩浆温差较小,野外未见明显的混合相带证实了这一推断的合理性。

4.2 岩石成因

前述元素-同位素地球化学的综合研究表明,龙窝岩体并非单纯起源于基底地壳物质的部分熔融,成岩过程中应有幔源组分的参与,岩体中深色闪长质包体的混合成因特点也支持这一认识。从产出构造背景来看,南岭地区在该岩体形成时(170 Ma ±)已处于伸展-减薄环境(范蔚茗等,2003),这已为区内近年来陆续报道的同时代基性火山岩(陈培荣等,1999; Wang *et al.*, 2003)和 A 型花岗岩(陈培荣等,1998)的研究所证实。

伸展-引张的构造环境有利于幔源基性岩浆的底侵及向上运移和聚集,并诱发地壳中的低共熔组分熔融产生酸性岩浆。Fernandez & Barbarin (1991)的研究表明,当基性的镁铁质岩浆注入已部分结晶的长英质岩浆中时,由于二种共存岩浆之间存在较大的粘度差,使得彼此之间不能发生完全的化学混合形成均一的岩浆,而主要表现为机械混合,这时未完全均匀混合的囊状或液粒状基性岩浆即形成微粒包体。

龙窝岩体深色闪长质包体与寄主岩具有相近的锆石饱和温度(分别为 741.8 ~ 756.8℃和 746.7 ~ 779.0℃,表 4),说明相混合的二种岩浆已达到热平衡。包体与寄主岩 Sr、Nd 同位素组成相近而元素组成存在较显著差别的特征也可用岩浆混合的观点得到合理的解释,因为两种熔体间同位素的扩散不需要改变熔体的结构,同位素交换比化学成分的交换容易得多(Lesher, 1990)。因此,龙窝花岗闪长岩及其中的闪长质包体是在伸展-引张构造背景下,由幔源基性岩浆及其诱发的壳源长英质岩浆混合作用的产物。

5 结论

(1) 龙窝花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 169.1 ± 2.5 Ma,属中侏罗世岩浆活动的产物。

(2) 龙窝花岗闪长岩铝弱过饱和,贫碱,富钾,富轻稀土和大离子亲石元素(如 K、Rb、Cs、Th、U),贫高场强元素(如 Nb、Ti)。闪长质包体具有与寄主岩相似的矿物组合,但铁镁矿物含量及过渡族元素(V、Cr、Co、Ni)丰度相对偏高,二者的主量和微量元素表现出混合成因的演化趋势。

(3) 龙窝花岗闪长岩和闪长质包体具有相似的 Sr、Nd 同位素组成,均为壳幔混熔岩浆结晶的产物。

(4) 岩石产出构造背景及地球化学特征的综合分析表明,龙窝花岗闪长岩及其中的闪长质包体是在伸展-引张构造背景下,由幔源基性岩浆及其诱发的壳源长英质岩浆混合作用的产物。

致谢 本项研究得到周新民教授的指导,并承审阅论文初稿,谨致谢忱!

References

Ballard J R, Palin J M, Williams I S, Campbell I H. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. Geology, 29: 383 - 386

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46: 605 - 626

Bergantz G W. 1989. Underplating and partial melting: implications for melt generation and extraction. Science, 245: 1093 - 1095

Black P L, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chem. Geol., 200: 155 - 170

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Elements

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Geochemistry. Amsterdam, Elservier, 63 – 44

Chappell B W, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25years later. Australia J. Earth Sci., 48: 489 – 499

Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. Tectonophysics, 284: 101 – 133

Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, Cai Bicong, Ling Hongfei, Ni Qisheng. 1998. Geochemical characteristics and *tectonic implication of Zhaibei A-type granitic intrusives in south* Jiangxi Province. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 289 – 298 (in Chinese with English abstract)

Chen Peirong, Kong Xinggong, Wang Yinxi, Ni Qisheng, Zhang Bangtong, Ling Hongfei. 1999. Rb-Sr isotopic dating and significance of Early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from south Jiangxi Province. Geological Journal of China Universities, 5(4): 379 – 383 (in Chinese with English abstract)

Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zhang Z, Ma G. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. J. Geol. Soc. London, 149: 171 – 184

Fan Weiming, Wang Yunjun, Guo Feng, Peng Touping. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the lithospheric extension. Earth Science Frontiers, 10(3): 159 – 169 (in Chinese with English abstract)

Faure G. 1986. Principles of isotope geology. Jones Willey & Sons, 141 – 249

Fernandez A N, Barbarin B. 1991. Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves. In: Dider J & Barbarin B (eds.), Enclaves and Granite Petrology, Amsterdam, Elsevier, 263 – 276

Garsset O, Albarede F. 1994. Hybridization of mingling magmas with different densities. Earth Planet. Sci. Lett., 121: 327 – 332

Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X, Liu Z, Wang G, Yuan K, Liu W, Kuang G, Wu H. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. J. Geophys. Res., 101: 16137 – 16154

Hong Dawei, Guo Wenqi, Li Gejing, Kang Wei, Xu Haiming. 1987. Petrology of the miarolitic granite belt in the southeast coast of Fujian province and their petrogenesis. Beijing: Science and Technology Press of Beijing, 1 – 132 (in Chinese with English abstract)

Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in south China and their metallogeny. Resource Geology, 48: 251 – 263

Huppert H E, Sparks R S J. 1998. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. J. Petrol., 29: 599 – 624

Jahn B M, Condie K C. 1995. Evolution of the Kaapvaal craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 2239 – 2258

Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N, Hart S R. 1978. A general mixing equation with application to Icelandic basalt. Earth Planet. Sci. Lett., 37: 380 – 392

Leake E B, Woolley A R, Arps C E S, *et al*. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. American Mineralogist, 82: 1019 – 1037

Lesher C E. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing. Nature, 344: 235 – 237

Maas R, Nicholls I A, Legg C. 1997. Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Deddick granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing. J. Petrol., 38: 815 – 841

Mao Jianren, Tao Kuiyuan, Lee Chi-yu, Xie Fanggui, Xu Naijing. 2002. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton, southeastern Fujian, and their significance. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 449 – 458 (in Chinese with English abstract)

McCulloch M T, Chappell B W. 1982. Nd isotopic characteristics of S- and I-type granites. Earth Planet. Sci. Lett., 58: 51 – 64

Miller R G, O'Nions R K. 1985. Source of Precambrian chemical and clastic sediments. Nature, 314: 325 – 330

Shen Weizhou, Zhu Jinchu, Liu Changshi, Xu Shijin, Ling Hongfei. 1993. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in south China and its constraint on material sources of granitoids. Acta Petrologica Sinica, 9(2): 115 – 124 (in Chinese with English abstract)

Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, Wang Dezi. 2000. Crust evolution in southeast China: evidence from Nd model ages of granitoids. Science in China (Series D), 43: 36 – 49

Shinjoe H. 1997. Origin of the granodiorite in the forearc region of southwest Japan: melting of the Shimano accretionary prism. Chem. Geol., 134: 237 – 255

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunder A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spe. Publ., 42: 313 – 345

Waight T E, Maas R, Nicholls I A. 2001. Geochemical investigations of microgranitoid enclaves in the S-type Cowra granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia. Lithos, 56: 165 – 186

Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, Li Xu. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in southeast Hunan province, China. Acta Petrologica Sinica, 17(1): 169 – 175 (in Chinese with English abstract)

Wang Y J, Fan W M, Guo F. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks around the Chenzhou-Linwu fault in South China: implications for lithospheric boundary between the Yangtze and the Cathaysia Blocks. International Geology Review, 45: 263 – 286

Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth Planet. Sci. Lett., 64: 295 – 304

Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, Wu Guangying, Tong Jinsong. 2003. The major frontiers of the recent studies of granite. Earth *Science Frontiers*, 10(3): 221 – 229 (in Chinese with English abstract)

Xu Keqin, Zhu Jinchu, Liu Changshi, Shen Weizhou, Xu Shijin. 1989. Genetic series and material sources of granitoids in south China. J. Nanjing University (Earth Science Edition), (3): 1 – 18 (in Chinese with English abstract)

Yin Jun, Zhou Guoqing. 1994. The ratios of Fe^{3+} to Fe^{2+} in amphiboles. J. Nanjing University (Earth Science Edition), 6(2): 176 – 183 (in Chinese with English abstract)

Yu Jinsheng, Gui Xuntang, Huang Lin. 1991. Sr-Nd-O-H isotope compositions of Silun migmatite field in Luoding, Guangdong,

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Guangdong Geology, 6(3): 73 - 82 (in Chinese with English abstract)

Zhao Zijie, Ma Daquan, Lin Huikun, Yuan Chunlin, Zhang Xiaohao. 1987. The geochemical characteristics and geological setting of the formation of Longwo and Fogang granitoid batholiths, Guangdong province. In: Research Reports of the Geology and Mineral Resources of Nanling (edited by Yichang Institute of Geology and Mineral Resources), Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 28 - 68 (in Chinese with English abstract)

Zhou Xunruo. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids. Earth Science Frontiers, 1(1 - 2): 97 - 97 (in Chinese with English abstract)

Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning. Acta Petrologica Sinica, (3): 63 - 73 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈培荣,章邦桐,孔兴功,蔡笙聪,凌洪飞,倪琦生. 1998. 赣南寨背A型花岗岩体的地球化学及其构造地质意义. 岩石学报,14(3): 289 - 298

陈培荣,孔兴功,王银喜,倪琦生,章邦桐,凌洪飞. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的Rb-Sr同位素定年及其意义. 高校地质学报, 5(4): 379 - 383

范蔚茗,王岳军,郭 锋,彭头平. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. 地学前缘, 10(3): 159 - 169

洪大卫, 郭文岐, 李戈晶, 康 炜, 徐海明. 1987. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化. 北京:北京科学技术出版社,1 - 132

毛建仁, 陶奎元, 李寄嵎, 谢芳贵, 许乃敬. 2002. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 18(4): 449 - 458

沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 徐士进, 凌洪飞. 1993. 华南基底变质岩的Sm-Nd同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. 岩石学报, 9(2): 115 - 124

王岳军, 范蔚茗, 郭 锋, 李旭. 2001. 湘东南中生代花岗闪长质小岩体的岩石地球化学特征. 岩石学报, 17(1): 169 - 175

肖庆辉, 邢作云, 张 昱, 伍光英, 竜劲松. 2003. 当代花岗岩成因研究的几个重要前沿. 地学前缘, 10(3): 221 - 229

徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 沈渭洲, 徐士进. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源. 南京大学学报(地球科学), (3): 1 - 18

殷俊, 周国庆. 1994. 闪石电子探针数据中 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的配比. 南京大学学报(地球科学), 6(2): 176 - 183

于津生, 桂训唐, 黄 琳. 1991. 广东罗定泗纶混合岩田同位素组成特征. 广东地质, 6(3): 73 - 82

赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 袁春林, 张小豪. 1987. 广东龙窝、佛岗花岗岩类岩体地球化学特征及其形成的地质背景. 见: 宜昌地质矿产研究所编, 南岭地质矿产科研报告集(一), 武汉: 武汉地质学院出版社, 28 - 68

周珣若. 1994. 花岗岩混合作用. 地学前缘, 1(1 - 2): 97 - 97

周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义. 岩石学报, (3): 63 - 73

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net